

УДК 622.235.53

Обобщение результатов многолетнего сейсмического мониторинга взрывных работ на известняковом карьере

© 2026 г. А.В. Верхованцев¹, Д.Ю. Шулаков¹, Е.В. Сергеев²

¹«ГИ УрО РАН», г. Пермь, Россия; ²АО «Сырьевая компания», г. Стерлитамак, Россия

Поступила в редакцию 03.03.2026 г.

Аннотация. Работа посвящена обобщению результатов сейсмического мониторинга взрывных работ на карьере известняка. Полученные в ходе многолетнего мониторинга данные позволили по-новому оценить степень влияния факторов, влияющих на амплитуду сейсмических волн от массовых взрывов. Проведён анализ сейсмограмм около 1500 массовых взрывов за шестилетний период непрерывных наблюдений. Доказано, что в условиях данного объекта нет явной связи вариаций амплитуды сейсмической волны с сезонными факторами, что позволяет упростить проектирование массовых взрывов. Сопоставление сейсмического эффекта взрывов блоков со взрывами одиночных скважин позволило выполнить оценку влияния точности работы неэлектрической системы инициирования на амплитуду сейсмической волны. Сделан вывод, что как минимум в условиях данного горнодобывающего предприятия амплитуда сейсмической волны определяется максимальной массой заряда на одну скважину, и повышение точности работы системы инициирования не позволит значимо снизить сейсмический эффект.

Ключевые слова: мониторинг, взрывные работы, сейсмическая безопасность, сейсмически безопасное расстояние, приведённое расстояние, коэффициент сейсмичности, система инициирования, сезонность.

Для цитирования: Верхованцев А.В., Шулаков Д.Ю., Сергеев Е.В. Обобщение результатов многолетнего сейсмического мониторинга взрывных работ на известняковом карьере // Российский сейсмологический журнал. – 2026. – Т. 8, № 2. – С. 80–88. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.2.06>. – EDN: WDZGBL

Вводная информация

В ранее опубликованной работе [Verkholantsev *et al.*, 2019] были представлены результаты сейсмического мониторинга взрывных работ на карьере известняка за 2016–2017 гг., а также дана краткая характеристика технологии буровзрывных работ (БВР) и охраняемых объектов. Выполнен анализ следующих факторов, влияющих на интенсивность сейсмического воздействия: тип взрывчатого вещества (ВВ), интервал замедления, количество скважин во взрываемом блоке, направление фронта детонации. Тогда был сделан вывод об отсутствии статистически значимого влияния этих факторов в условиях изучаемого горнодобывающего предприятия.

Комплекс работ по изучению спектральных (резонансных) характеристик грунтов выявил существенную латеральную изменчивость грунтовых условий на исследуемой территории – коэффициент усиления колебаний грунтами

$k_{гр}$ изменяется в пределах 0.6–2.2. Данные о пространственной изменчивости коэффициентов усиления грунтами позволили улучшить прогнозные оценки сейсмического воздействия взрывов.

В настоящее время продолжают работы по непрерывному мониторингу сейсмического воздействия взрывных работ на близлежащие охраняемые инженерные сооружения. Общая схема расположения пунктов наблюдения приведена на рис. 1. Аппаратурное обеспечение сейсмической станции подробно описано в работе [Верхованцев, Шулаков, 2026] и включает следующее оборудование:

- велосиметр Mini SeisMonitor;
- сейсмический регистратор «Ермак-5»;
- GSM-модем;
- контур защиты и аварийного питания.

Для облегчения сбора и анализа большого объёма данных применяется специализированное программное обеспечение – система учёта и планирования взрывных работ на горнодобывающих

предприятиях Blast Manager [Дягилев, 2018]. Система предназначена для создания базы исходных данных с удобным интерфейсом, позволяющим задать все параметры БВР (время взрыва, координаты скважин и их параметры, масса ВВ и длина зарядов, тип ВВ, тип взрыва, тип взрываемых пород и др.), свойства охраняемых объектов (пространственное положение, класс, ранг, грунты в основании и их частотные характеристики и др.) и измерить величину основных характеристик сейсмических волн (максимальная амплитуда, преобладающая частота, время прихода волн от разных зарядов, углы поляризации волн и др.). В качестве основного критерия сейсмической опасности выступает предельно допустимая скорость колебания грунта в основании охраняемых сооружений, которая определяется с учётом разделения объектов по их классу и суммарному рангу согласно классификации РБ Г-05-039-96.

Аналитическая часть системы позволяет определять параметры затухания волн, оценивать усиление грунтов, делать различные выборки из базы исходных данных для их анализа сторонними средствами. Также есть возможность

моделировать волновые формы короткозамедленных взрывов, опираясь на записи одиночных (эталонных) взрывов. Данный функционал позволяет ещё на этапе проектирования взрыва определить диапазон замедлений, обеспечивающих минимальный сейсмический эффект. В конечном итоге такой подход даёт возможность заранее спланировать и оптимизировать параметры БВР для конкретного блока таким образом, чтобы все объекты на охраняемой территории не испытывали сверхнормативных нагрузок.

Постановка задачи

Непрерывный многолетний мониторинг сейсмического воздействия взрывных работ дал огромный объём уникальной информации, которую ещё предстоит детально проанализировать. На конец 2025 г. накоплены данные (волновые формы, параметры отработанных блоков) для около 1500 взрывов (более 10000 физических наблюдений).

В настоящее время задача прогнозирования скорости смещения $V_{пр}$ в конкретном пункте решается при помощи уравнения:



Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения

$$V_{\text{пр}} = a \cdot R_{\text{пр}}^{-b} \cdot k_{\text{гр}}, \quad (1)$$

где a – эмпирический коэффициент сейсмичности, b – показатель затухания волн, $k_{\text{гр}}$ – коэффициент усиления колебаний за счёт грунтовых условий, $R_{\text{пр}}$ – приведённое расстояние, определяемое по формуле:

$$R_{\text{пр}} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \quad (2)$$

где R – расстояние до взрыва, м, Q – масса заряда, кг.

Целью мониторинговых наблюдений является повышение эффективности ведения БВР за счёт управления величиной сейсмического воздействия, так как именно она во многих случаях является фактором, ограничивающим применение технологически оптимальных схем взрывания. При этом накопленный объём данных позволяет выполнить детальный анализ факторов, влияющих на величину сейсмического воздействия взрывных работ, и оценить степень влияния каждого из них. Два таких фактора – сезонные изменения условий и влияние системы инициирования – рассматриваются в данной статье.

Влияние фактора сезонности на сейсмический эффект взрыва

Под фактором сезонности в данной работе понимается интегральное влияние возможного изменения физико-механических свойств взрывааемых пород, а также влияние промерзания грунта и изменения уровня грунтовых вод (УГВ) вблизи охраняемых объектов на амплитуду сейсмической волны от взрывных работ.

В работе [Кутуев и др., 2025] проанализированы данные более 90 экспериментальных замеров сейсмического воздействия в ближней и промежуточной зонах на четырёх горнодобывающих предприятиях. При этом линия регрессии при максимальном сейсмозрывном воздействии для положительных температур окружающей среды для Олимпиадинского месторождения определена всего лишь по четырём точкам (физическим наблюдениям). Результаты работы позволили усовершенствовать методику по обеспечению сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ в части прогнозирования уровня сейсмического воздействия в различных зонах взрыва при приближении горных работ к охраняемым объектам, с учётом фактора сезонности.

В целом грунтовые условия в пункте наблюдения являются очень важным фактором, влияющим на величину сейсмического воздействия: разница в усилении (ослаблении) колебаний в пределах относительно небольшой территории может достигать нескольких раз [Verkholantsev et al., 2019]. При этом есть основания считать, что данный эффект обусловлен преимущественно структурой и литологией горных пород. Так, в работе [Верхоланцев, 2019] приведены результаты изучения роли вариации гидрогеологических (УГВ) и сезонных (промерзание грунта) условий. Для этого использованы подходы, применяемые в методах сейсмического микрорайонирования. В течение года раз в месяц проводились наблюдения методом регистрации взрывов, способом Накамуры, а также методом SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves – Спектральный анализ поверхностных волн*). Анализировалось изменение величины усиления сигнала, рассчитанное по сейсмическим волнам разной длины. По результатам сделан вывод о слабой зависимости усилений (не больше 10%) от сезонных вариаций.

Оценка влияния фактора сезонности на сейсмический эффект взрыва в рамках исследуемого горнодобывающего предприятия производилась по величине усиления U :

$$U = V_{\text{факт}} / V_{\text{пр}}, \quad (3)$$

характеризующего отклонение фактически измеренных скоростей смещения $V_{\text{факт}}$ от ожидаемых (прогнозных) значений $V_{\text{пр}}$. При этом расчёт $V_{\text{пр}}$ выполняется с учётом коэффициента усиления грунтами для конкретного пункта измерения (1). Таким образом, анализируются данные по двум стационарным сейсмическим станциям за шестилетний период непрерывных наблюдений (рис. 2). Одна сейсмическая станция (01) расположена на севере от карьера (диапазон эпицентральных расстояний 500–1300 м), вторая (02) – на юге (700–1700 м). В выборку данных вошли все без исключения взрывы, проведённые за рассматриваемый временной диапазон (более 1000 физических наблюдений по каждой станции). В связи с большим количеством исходных данных и значительным разбросом значений расчёт средних величин усилений выполнялся в скользящем 14-дневном окне. Для наглядности на графике (рис. 2) также показаны фактические значения U для станции 01. Результирующие кривые усилений колебаний в зависимости от времени позволяют сделать вывод, что в условиях данного горнодобывающего предприятия влияние фактора сезонности на сейсмический

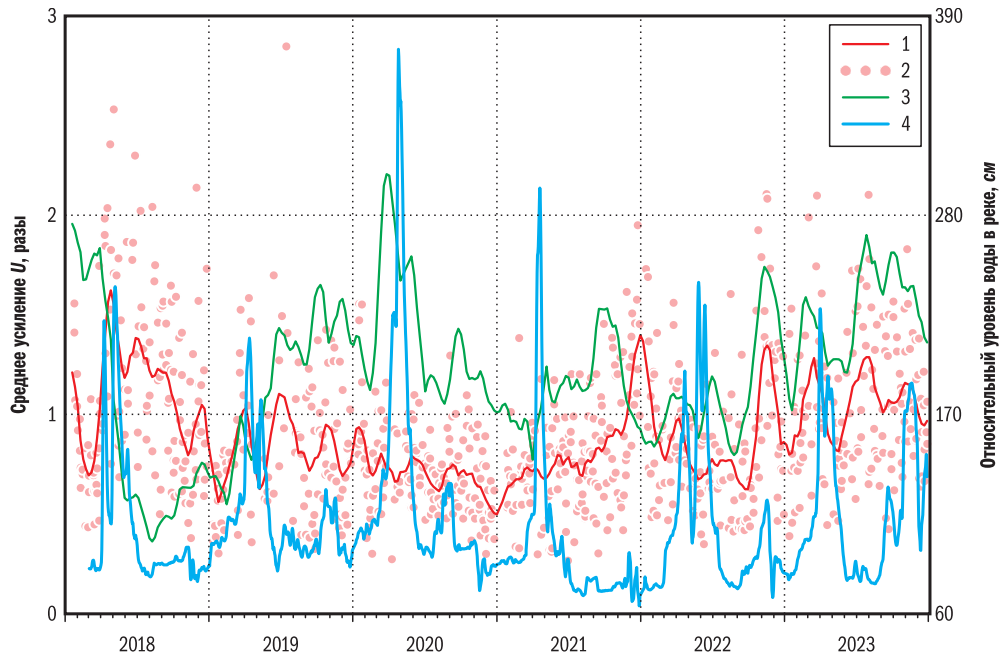


Рис. 2. Зависимость усиления колебаний при взрывах от фактора сезонности.

1 — осреднённые усиления колебаний U для сейсмостанции 01; 2 — фактические значения U для сейсмостанции 01; 3 — осреднённые усиления колебаний для сейсмостанции 02; 4 — относительный уровень реки (УГВ)

эффект взрыва не прослеживается. Закономерностей изменения усиления/ослабления амплитуды колебаний в зависимости от времени года также выявлено не было (объект находится в зоне внутриконтинентального климата умеренных широт).

Для поиска возможной корреляции усиления с УГВ привлечены гидрологические данные — уровень воды реки, протекающей в 1 км к северу от карьера (рис. 1). Полученные гидрологические данные также свидетельствуют об отсутствии их корреляции с изменением усиления колебаний от взрывов.

Сопоставление сейсмического воздействия массовых и одиночных взрывов (влияние точности работы системы инициирования)

На исследуемом горнодобывающем предприятии для реализации короткозамедленного взрывания применяется неэлектрическая система инициирования (НСИ) «ИСКРА». По отношению к сейсмическому действию взрыва использование НСИ имеет важную особенность — есть высокая вероятность отклонения фактического времени замедления от номинального (паспортного). Например, согласно паспорту, среднеквадратичные отклонения времени замедления инициирующего устройства

ИСКРА-С-500 при длине волновода 4 м составляют 10.5 мс. Этот аспект отмечается многими современными исследователями в данной области [Эквист, 2009; Епанов et al., 2019; Добрынин, 2023; Кондратьев и др., 2019; Флягин и др., 2018; Yang, Scovira, 2010; Zhang, 2016] и сильно затрудняет реализацию прогноза уровня сейсмического воздействия, поскольку взрывы отдельных ступеней замедления могут накладываться друг на друга случайным образом.

При обработке сейсмограмм записей взрывов было установлено, что величина воздействия взрывов в одном и том же пункте может существенно варьироваться. Зафиксированы случаи, когда скорость смещения в основании охраняемого сооружения от взрывов смежных блоков отличалась более чем в 2 раза при одинаковых параметрах БВР. Было предположено, что основной причиной такого разброса амплитуд является случайное наложение (интерференция) волн от разных ступеней замедления вследствие неточной работы НСИ.

Возможность проверить данную гипотезу на исследуемом горнодобывающем предприятии появилась после организации серии взрывов одиночных скважин. Регистрация осуществлялась в стационарных пунктах наблюдения. Сопоставление амплитуд сейсмических волн от взрывов одиночных скважин с массовыми

взрывами смежных с ними блоков представлено на рис. 3. В качестве анализируемого параметра выбрана амплитуда колебаний – максимальный мгновенный модуль вектора массовой скорости смещения, построенная в зависимости от приведённого расстояния $R_{пр}$. Приведённое расстояние учитывает максимальную величину одновременно инициируемого заряда и расстояние от взрыва до пункта измерения. Разные пункты регистрации обозначены разными символами (квадраты, крестики и т.д.). Дополнительно на график нанесена фактическая величина воздействия от взрывов всех блоков за годовой интервал наблюдения. Основные параметры массовых взрывов: до 13 скважин, поскважинное взрывание с интервалом замедления 67 мс. Как видно из плана на рис. 3, постановка эксперимента осуществлялась с учётом пространственного расположения – взрывы одиночных скважин выполнялись в разных частях карьера для учёта возможного изменения амплитуды колебаний из-за рассеивания части энергии при прохождении волн через его центральную часть.

Полученные данные демонстрируют, что при одинаковом приведённом расстоянии сейсмическое воздействие от одиночных и массовых взрывов находится на одном уровне. Разброс значений относительно средней (прогнозной) зависимости для взрывов одиночных скважин также сопоставим с взрывами блоков. Таким обра-

зом, можно сделать вывод, что в условиях данного горнодобывающего предприятия погрешность (неточность) работы НСИ не приводит к дополнительному усилению/ослаблению сейсмического эффекта в конкретной точке охраняемой территории и не оказывает существенного влияния на разброс от средней (прогнозной) зависимости. Вместе с этим, полученный разброс значений относительно средней (прогнозной) зависимости для взрывов блоков не исключает влияние неточной работы замедлителей для отдельных взрывов.

Обсуждение результатов

Анализ вариаций усиления сейсмических волн грунтами в основании защищаемых объектов за шестилетний период показал отсутствие явной корреляции как с сезонными изменениями температуры, так и с уровнем грунтовых вод. Однако, несмотря на это, говорить об исключении влияния фактора сезонности на сейсмический эффект взрыва представляется преждевременным. Вполне возможно, что его влияние не удастся определить на фоне других факторов, ещё не выявленных и не учтённых.

Отдельного анализа требует результат сопоставления сейсмического воздействия одиночных и массовых взрывов в одних и тех же пунктах наблюдения. Тот факт, что амплитуда

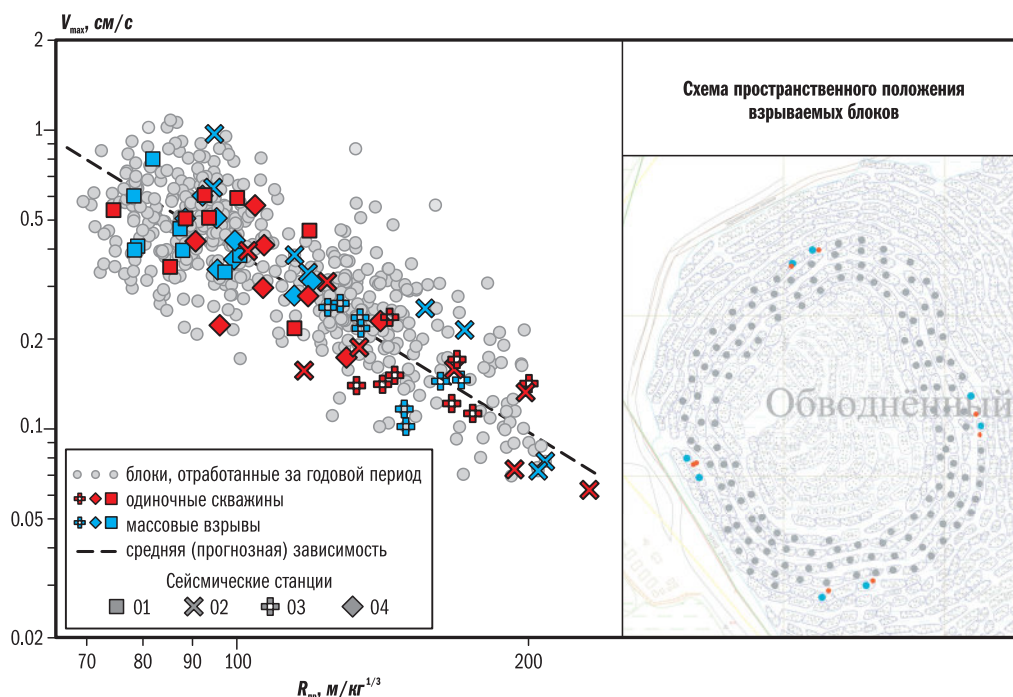


Рис. 3. Сопоставление величины сейсмического воздействия массовых и одиночных взрывов (номер сейсмической станции соответствует рис. 1)

сейсмической волны практически полностью определяется величиной заряда на одну скважину и расстоянием и практически никак не зависит от схемы взрывания, можно интерпретировать по-разному. Одним из возможных вариантов представляется то, что интерференционное усиление (ослабление) колебаний от разных ступеней замедления «теряется» среди других факторов, значительно влияющих на динамические характеристики сейсмической волны. Однако наиболее логичным представляется объяснение, что в условиях данного горнодобывающего предприятия просто отсутствуют предпосылки для возникновения наложения волн вследствие изначально безопасных параметров инициирования (при условии нормальной работы НСИ): поскважинное взрывание с интервалами замедления 67 мс и размером сетки скважин 6×6 м. Другими словами, начальный (обладающий максимальной амплитудой) импульс успевает «пробежать» место взрыва следующей скважины. Соответственно, наложение возможно только для *P*- и *S*-волн от разных ступеней замедления. Однако для взрывов характерна очень слабая генерация *S*-волн, и влияние интерференции на итоговую амплитуду сейсмической волны оказывается незначительным.

В целом, обобщение результатов длительного непрерывного мониторинга позволяет несколько изменить общий взгляд на обеспечение сейсмической безопасности при взрывных работах, причём некоторые выводы являются довольно «контринтуитивными». С одной стороны, влияние локальных грунтовых условий оказалось очень велико – изменчивость усилений в пределах достаточно компактной территории может достигать двух и более раз. С другой стороны, с течением времени эти усиления могут существенно изменяться, но связь этих изменений с сезонными колебаниями физических свойств пород и УГВ проследить не удалось.

Отдельно стоит обратить внимание на тот факт, что измерения фактической величины сейсмического воздействия проводятся многими горнодобывающими предприятиями, но чаще всего такие работы носят разовый или, в лучшем случае, периодический характер. При этом не редки случаи, когда результаты замеров буквально нескольких взрывов ложатся в основу таких принципиально важных документов, как проекты массовых взрывов, план развития горных работ или регламенты технологических производственных процессов. В этом отношении постоянный контроль сейсмического воз-

действия взрывных работ на охраняемые инженерные сооружения позволяет получать данные для анализа «сеймики» на качественно ином уровне. К тому же современный уровень развития средств измерения и передачи данных позволяет осуществлять непрерывный мониторинг величины сейсмического воздействия с высокой экономической эффективностью.

Выводы

Полученные в ходе многолетнего мониторинга данные позволили оценить степень воздействия факторов, влияющих на амплитуду сейсмической волны от массовых взрывов. Отсутствие выраженной сезонной изменчивости сейсмического воздействия позволяет упростить проектирование массовых взрывов и использовать одинаковые параметры БВР в течение всего года.

Очень важным, хотя и несколько неожиданным, результатом оказалось фактическое отсутствие разницы в сейсмическом воздействии от одиночных и массовых взрывов – амплитуда сейсмической волны в одних и тех же пунктах наблюдения (т.е. коэффициент усиления грунтами не меняется) определяется только максимальной массой заряда в одной скважине и расстоянием до неё. Это означает, что при оценке сейсмической безопасности наложение (интерференция) сейсмических волн от отдельных ступеней массовых взрывов является второстепенным фактором (по крайней мере, для условий рассматриваемого объекта). Одним из следствий является то, что переход на дорогие высокоточные электронные системы инициирования не поможет снизить среднюю величину сейсмического воздействия от взрывных работ, и для решения этой задачи надо искать другие пути.

В целом можно сделать заключение, что в сложных горнотехнических условиях, когда взрывные работы ведутся на небольших расстояниях от охраняемых объектов и величина сейсмического воздействия приближается к предельно допустимым значениям, непрерывный инструментальный контроль является единственным действительно надёжным и эффективным способом обеспечения безопасности БВР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания «ГИ УрО РАН» (регистрационный номер НИОКТР 126012716041-5).

Литература

- Верхоланцев А.В., Шулаков Д.Ю.* Сопоставление сейсмического воздействия взрывных работ при применении электрических и электронных систем инициирования // Горный журнал. – 2026. – № 2. – С. 55–60. – DOI: 10.17580/gzh.2026.02.06
- Верхоланцев А.В.* Роль вариаций гидрогеологических и сезонных условий на изменение характеристик сейсмических колебаний вблизи Кунгурской ледяной пещеры // Горное эхо. – 2019. – № 4 (77). – С. 62–67. – DOI: 10.7242/echo.2019.4.15. – EDN: AYNJDI
- Добрынин А.А.* Прогресс средств и систем инициирования: вектор роботизации взрывных работ в горной промышленности // Рациональное освоение недр. – 2023. – № 6 (74). – С. 60–76. – DOI: 10.26121/RON.2023.74.6.004. – EDN: GVSUWV
- Дягилев Р.А.* Blast Manager. Программа расчёта оптимальных параметров буровзрывных работ по уровню сейсмического воздействия на здания и сооружения. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018610154 от 09.01.2018. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – EDN: WCIFRN
- Кондратьев С.А., Сысоев А.А., Катанов И.Б.* Анализ результатов заводских испытаний устройств «Искра» для инициирования скважинных зарядов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 6 (136). – С. 72–78. – DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-72-78. – EDN: GEYUBL
- Кутуев В.А., Жариков С.Н., Меньшиков П.В., Флягин А.С.* Совершенствование методики сейсмобезопасного производства БВР с учётом фактора сезонности // Взрывное дело. – 2025. – № 146-103. – С. 151–166. – EDN: TQYMOH
- Флягин А.С., Меньшиков П.В., Шеменев В.Г.* Анализ величин фактических интервалов замедлений неэлектрических систем инициирования // Проблемы недропользования. – 2018. – № 2 (17). – С. 70–74. – EDN: XSESTB
- Эквист Б.В.* Обоснование и разработка методов повышения безопасности сейсмического проявления короткозамедленного взрывания на горных предприятиях: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2009. – 224 с.
- Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Vorona U.Yu., Serezhnikov N.A.* Seismic impact of industrial blasts in Western Siberia and induced seismicity // Seismic Instruments. – 2019. – V. 55, Iss. 4. – P. 410–426. – DOI: 10.3103/S0747923919040066
- Verkholantsev A.V., Dyagilev R.A., Shulakov D.Y., Shkurko A.V.* Monitoring of earthquake loads from blasting in the Shakhtau open pit mine // Journal of Mining Science. – 2019. – V. 55, N 2. – P. 229–238. – DOI: 10.1134/S1062739119025503. – EDN: XIGGNC
- Yang R., Scovira D.S.* A model for near and far-field blast vibration based on multiple seed waveforms and transfer functions // FragBlast. – 2010. – V. 4, N 2. – P. 91–116.
- Zhang Z.-X.* Rock fracture and blasting: Theory and applications. – Butterworth-Heinenmann Elsevier, 2016. – 528 p.

Сведения об авторах

Верхоланцев Александр Викторович, канд. техн. наук, науч. сотр. «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»), г. Пермь, Россия. E-mail: vercholancev@gmail.com

Шулаков Денис Юрьевич, канд. техн. наук, зав. лаб. «ГИ УрО РАН», г. Пермь, Россия. E-mail: shulakov@mi-perm.ru

Сергеев Евгений Викторович, гл. инженер карьера Акционерного общества (АО) «Сырьевая компания», г. Стерлитамак, Россия. E-mail: sergeev@bashmrc.ru

Summary of the results of long-term seismic monitoring seismic signals from blasting in open pit mine

© 2026 A.V. Verkholtantsev¹, D.Y. Shulakov¹, E.V. Sergeev²

¹MI UB RAS, Perm, Russia; ²JSC "Raw Materials Company", Sterlitamak, Russia

Received March 3, 2026

Abstract This paper summarizes the results of seismic monitoring of blasting operations at a limestone quarry. Data obtained during long-term monitoring allowed for a new assessment of the influence of factors affecting the amplitude of seismic waves from mass blasts. An analysis of seismograms from more than 1500 mass explosions over a 6-year period of continuous observations was conducted. It was demonstrated that at this facility there is no clear correlation between seismic wave amplitude variations and seasonal factors, which simplifies the design of mass blasts. A comparison of the seismic impact of block blasts with single-hole blasts allowed for an assessment of the impact of the accuracy of the non-electric initiation system. It was concluded that at least at this mining facility seismic wave amplitude is determined by the maximum charge mass per borehole, and improving the accuracy of the initiation system will not significantly reduce the seismic effect. The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia within the framework of state contract, R&D project registration No. 1024032500070–8-2.7.5.

Keywords Monitoring, blasting operation, seismic safety, seismically safe distance, reduced distance, seismicity coefficient, initiating systems, seasonality.

For citation Verkholtantsev, A.V., Shulakov, D.Y., & Sergeev, E.V. (2026). [Summary of the results of long-term seismic monitoring seismic signals from blasting in open pit mine]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 8(2), 80-88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.2.06>. EDN: WDZGBL

References

- Dobrynin, A.A. (2023). [Progress of initiating means and systems: The robotization vector of blasting work in the mining industry]. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Rational Development of Subsoil Resources], (6(74)), 60-76. (In Russ.). DOI: [10.26121/RON.2023.74.6.004](https://doi.org/10.26121/RON.2023.74.6.004). EDN: GVSUV
- Dyagilev, R.A. (2018). [Blast Manager. A program for calculating optimal parameters for drilling and blasting operations based on the level of seismic impact on buildings and structures]. Certificate of state registration of a computer program No. 2018610154. (In Russ.). EDN: WCIFRH
- Ekvist, B.V. (2009). [Substantiation and development of methods to enhance seismic safety of short-delay blasting in mines. Dr. of engineering sci. diss.]. Moscow, Russia, 224 p. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Shevkunova, E.V., Vorona, U.Yu., & Serezhnikov, N.A. (2019). Seismic impact of industrial blasts in Western Siberia and induced seismicity. *Seismic Instruments*, 55(4), 410-426. DOI: [10.3103/S0747923919040066](https://doi.org/10.3103/S0747923919040066)
- Flyagin, A.S., Menshikov, P.V., & Shemenov, V.G. (2018). [Analysis of the values of the actual deceleration intervals of non-electric initiation systems]. *Problemy nedropol'zovaniia* [Problems of Subsoil Use], (2(17)), 70-74. (In Russ.). EDN: XSESTB
- Kondratyev, S.A., Sysoev, A.A., & Katanov, I.B. (2019). [Analysis of factory test results of non-electric detonators "Iskra" for initiation of downhole charges]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], (6(136)), 72-78. (In Russ.). DOI: [10.26730/1999-4125-2019-6-72-78](https://doi.org/10.26730/1999-4125-2019-6-72-78). EDN: GEYUBL
- Kutuev, V.A., Zharikov, S.N., Menshikov, P.V., & Flyagin, A.S. (2025). [Improving the methodology of seismic safety production of BVR, taking into account the seasonality factor]. *Vzryvnoe delo* [Explosive Case], (146-103), 151-166. (In Russ.). EDN: TQYMOH
- Verkholtantsev, A.V. (2019). [The role of variations in hydrogeological and seasonal conditions on changes in the characteristics of seismic vibrations near the Kungur Ice Cave]. *Gornoe ekho* [Mountain Echo], (4(77)), 62-67. (In Russ.). DOI: [10.7242/echo.2019.4.15](https://doi.org/10.7242/echo.2019.4.15). EDN: AYNJDI

- Verkholantsev, A.V., Dyagilev R.A., Shulakov, D.Y., & Shkurko, A.V. (2019). Monitoring of earthquake loads from blasting in the Shakhtau open pit mine. *Journal of Mining Science*, 55(2), 229-238. DOI: 10.1134/S1062739119025503. EDN: XIGGNC
- Verkholantsev, A.V., & Shulakov, D.Y. (2026). [Comparison of the seismic impact of blasting operations using electrical and electronic initiation systems]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], (2), 55-60. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2026.02.06
- Yang, R., & Scovira, D.S. (2010). A model for near and far-field blast vibration based on multiple seed waveforms and transfer functions. *FragBlast*, 4(2), 91-116.
- Zhang, Z.-X. (2016). *Rock fracture and blasting: Theory and applications*. Butterworth-Heinenmann Elsevier, 528 p.

Information about authors

Verkholantsev Aleksandr Victorovich, PhD, Researcher of the “Mining Institute Ural Branch Russian Academy of Sciences” Branch of the Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences (MI UB RAS), Perm, Russia. E-mail: vercholantsev@gmail.com

Shulakov Denis Yurievich, PhD, Head of Laboratory of the MI UB RAS, Perm, Russia. E-mail: shulakov@mi-perm.ru

Sergeev Evgeny Viktorovich, Chief Engineer of the Joint Stock Company (JSC) “Raw Materials Company”, Sterlitamak, Russia. E-mail: sergeev@bashmrc.ru